

УДК 621.9.048.7:621.9.048.6

Лесик Д.А. к.т.н.; Джемелінський В.В. к.т.н., проф.; Данилейко О.О.; Хижевський В.В.
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОРЕЛЬЄФУ ТА СТРУКТУРИ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ЛАЗЕРНІЙ ТА УЛЬТРАЗВУКОВІЙ ТЕРМОДЕФОРМАЦІЙНІЙ ОБРОБЦІ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СТАЛІ

Lesyk D., Dzhemelinskiy V., Danyleiko O., Hyzhevskiy V.
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine (lesyk_d@ukr.net)

RESEARCH OF MICRORELIEF AND STRUCTURE OF THE SURFACE LAYER BY LASER AND ULTRASONIC THERMO-STRAINING TREATMENT OF TOOL STEEL

В даній статті, для поліпшення мікрорельєфу та структури поверхневого шару інструментальної сталі, запропоновано комбінований спосіб лазерного термозміцнення та наступного ультразвукового деформаційного зміцнення і оздоблювання. Приведені результати експериментальних досліджень формування мікрорельєфу на поверхні, а також закономірності зміни структури та мікротвердості поверхневого шару інструментальної сталі У8 з використанням CO₂ лазера та однобоеккового ультразвукового наконечника. Встановлено вплив технологічних режимів лазерної термообробки (потужність лазерного променя і швидкість обробки) на структуру, мікротвердість та розміри зони термічного впливу. Показано, що мікротвердість приповерхневих шарів підвищилася більше чим в 3.5 рази при лазерній термообробці, а при ультразвуковій деформаційній обробці на 30...40% в порівнянні з вихідним станом. Використання комбінованого термодформаційного способу зміцнення та оздоблювання забезпечило поліпшення в 2 рази шорсткості та підвищення в 4.5 рази мікротвердості поверхневого шару у порівнянні з необробленою поверхнею, що дозволить підвищити зносостійкість робочих поверхонь інструментів.

Ключові слова: лазерна термообробка; ультразвукова деформаційна обробка; сталь У8, поверхневий шар; мікрорельєф; шорсткість; структура; твердість.

Вступ

Якість поверхневого шару є одним із головних факторів, який визначає довговічність деталей та виробів. Підвищення зносостійкості робочих поверхонь інструментів є однією із основних проблем при виготовленні виробів в машинобудуванні. Зміцнення поверхневого шару за рахунок його зміни структури є одним із важливих технологічних рішень. Зміцнення поверхні може бути досягнуто різними методами.

У порівнянні з іншими методами, застосування лазерних технологій для зміцнення робочих поверхонь інструментів є одним із найбільш ефективних способів у виробничому процесі. До того ж лазерна термообробка робочих поверхонь виробів гарантує відсутність температурних деформацій, забезпечує зниження енергоємності процесу обробки [1].

Лазерне поверхнєве зміцнення інструментальних сталей, як з оплавленням поверхні, так і без такої [2,3], ударне зміцнення [4] аналогічно іншим видам загартування полягає у формуванні на етапі високошвидкісного нагрівання аустенітної структури, утвореної у тому числі внаслідок розчинення карбідних фаз, з наступним її перетворенням, на етапі охолодження, в мартенсит. При цьому швидкості нагрівання й охолодження складають близько 10⁶ до 10⁷ °C/с, які обумовлюють утворення особливих високодисперсних мікроструктур з високою мікротвердістю.

Відомо [2], що лазерна термообробка (ЛТО) сталейних виробів при густині потужності лазерного випромінювання 10³...10⁴ Вт/см² й тривалості впливу мілісекундного діапазону передбачає структурні зміни в поверхневому шарі і не приводить до розплавлення опроміненої зони. Параметри мікрорельєфу лише незначно змінюються внаслідок формування оксидної плівки на оброблюваній поверхні [1,2]. Глибина зміцнення складає 0.02...0.5 мм при мікротвердості поверхневого шару приблизно до 10 ГПа та залежить також від об'єму деталі, який впливає на швидкість охолодження зони загартування [5].

Лазерне оплавлення поверхні матеріалу в опроміненій зоні призводить до більш суттєвої зміни стану поверхневих шарів металів і сплавів, включаючи зміну їх хімічного складу, збільшення глибини зміцнення, формування на їх поверхнях мікрорельєфу [3]. Такий вид зміцнення з оплавленням поверхні потребує більш високої густини потужності лазерного випромінювання 10⁴...10⁵ Вт/см². В залежності від оброблюваної поверхні, оплавлення матеріалу дозволяє підвищити глибину зміцнення до 0.2...2.5 мм, утворюючи в

приповерхневому шарі понижено мікротвердість ($\sim 4 \dots 8$ ГПа) в порівнянні із нижче розташованою по глибині зоною зміцнення з твердої фази ($\sim 7 \dots 11$ ГПа) [6]. ЛТО з оплавленням поверхні широко використовується для загартування інструментальних легованих сталей, які містять карбідні включення (Cr, W, Mo, V і т.д.) [7].

Крім того, лазерна імпульсна обробка для поверхневого зміцнення металів забезпечується при використанні густини потужності випромінювання $10^8 \dots 10^{10}$ Вт/см² з мінімальною тривалістю впливу випромінювання ($10^{-6} \dots 10^{-8}$ с) на поверхню [4,8]. В залежності від тривалості та енергії лазерних імпульсів, а також від швидкості переміщення лазерного променя вздовж поверхні, в матеріалі можуть відбуватись різні фазові перетворення та структурні зміни [8].

Однак, для отримання поверхневого шару з більш якісними фізико-механічними властивостями доцільно використовувати комбіноване термодформаційне зміцнення та оздоблювання без оплавлення оброблюваної поверхні в поєднанні з методами поверхнево-пластичного деформування (ППД), сутність процесу якого полягає в тому, що лазерне випромінювання, сфокусоване в пляму круглої або прямокутної форми, при відносному переміщенні нагріває поверхневий шар матеріалу деталі з наступним статичним [9] або динамічним деформуванням [10]. Реалізація ППД динамічними методами (наприклад, безабразивна ультразвукова фінішна обробка, ультразвукова ударна обробка) має деякі важливі переваги перед статичними методами деформування [11], зокрема забезпечення більших значень глибини та твердості зони деформаційного впливу, а також залишкових напружень стиску.

В основі комбінованої термодформаційної обробки лежить ідея комплексного використання переваг та нівелювання недоліків зміцнення за допомогою використання лазерів безперервного або імпульсного випромінювання та деформаційних інструментів при проведенні різних технологічних процесів зміцнювально-оздоблюваної обробки. Такий процес комбінованого зміцнення та оздоблювання може забезпечити як поліпшення параметрів мікрорельєфу, так і підвищення фізико-механічних властивостей поверхневого шару.

Мета

Дослідити особливості формування мікрорельєфу на поверхні, а також мікроструктури та мікротвердості поверхневого шару інструментальної сталі У8 при використанні лазерного термозміцнення та наступного ультразвукового деформаційного зміцнення і оздоблювання для підвищення зносостійкості робочих поверхонь інструментів.

Дослідження

Матеріал та методика проведення експерименту.

У даній роботі, комбіновану лазерну термодформаційну обробку проводили за роздільною схемою (попереднє лазерне термозміцнення з наступним ультразвуковим вигладжуванням) при кімнатній температурі. Дослідження проведені, з використанням інструментальної сталі У8, яка широко використовується для виготовлення інструменту, що працює в умовах інтенсивного тертя та зношування при високих температурах. Хімічний склад сплаву такий (%): Fe – 97, C – 0.8, Si – 0.5, Mn – 0.5, Ni < 0.25, Cr < 0.2, Cu < 0.25, інші домішки – менше 0.01. Зразки із сталі У8, розмірами $h \times l \times b = 6 \times 15.5 \times 11$ мм, попередньо піддавали відпалу протягом однієї години при температурі 650 °С. Процес лазерної термообробки (рис. 1а) здійснювали CO₂ лазером безперервної дії (лазер «Комета2») потужністю 800 Вт з довжиною хвилі випромінювання 10.6 мкм та швидкістю обробки 1 м/хв (режим ЛТО1), 2 м/хв (режим ЛТО2) та 3 м/хв (режим ЛТО3) для отримання зміцнених зон різної глибини. Лазерне випромінювання фокусували в пляму діаметром 3 мм. Зразки попередньо шліфували, а також змащували розчином оксиду цинку для підвищення поглинальної здатності оброблюваної поверхні.

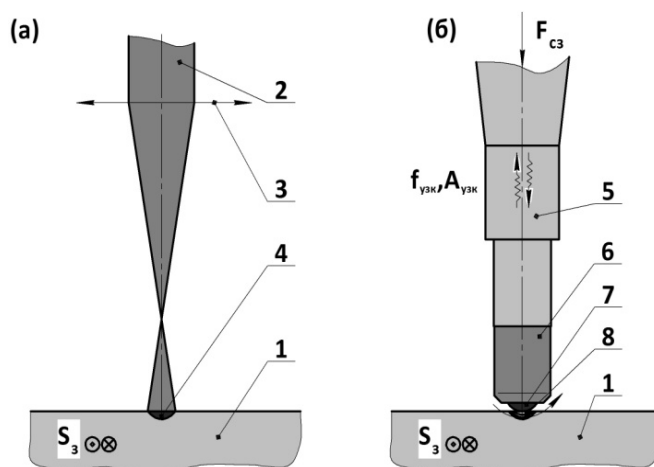


Рис. 1. Схема лазерної термообробки (а) та ультразвукової деформаційної обробки (б):
 1 – зразок, 2 – лазерний промінь, 3 – фокусувальна лінза, 4 – зона термічного впливу, 5 – ультразвуковий концентратор, 6 – одинийковий наконечник, 7 – бойок, 8 – зона деформаційного впливу

Тривалість лазерного впливу $t_{\text{лп}}$ (с), яку визначали відношенням діаметру $d_{\text{лп}}$ лазерного променя (мм) на швидкість переміщення оброблюваної поверхні S (мм/с), знаходилась в діапазоні 0.18...0.06 с при швидкостях обробки 16.6...50 мм/с.

Густину енергії лазерного променя визначали за формулою [10]:

$$E_{\text{лп}} = P / d_{\text{лп}} \cdot S, \quad (1)$$

де P – потужність лазерного променя, Вт, $d_{\text{лп}}$ – діаметр лазерного променя, см, S – швидкість переміщення оброблюваної поверхні, см/с.

У даному дослідженні, розрахована величина густини потужності випромінювання $W_{\text{лп}}$ при лазерній термообробці становила приблизно 10^4 Вт/см², що дозволило при тривалості лазерного впливу 0.18...0.06 с здійснити лазерне термічне зміцнення інструментальної сталі У8 як із оплавленням поверхні (режим ЛТО1), так і без оплавлення поверхні (режими ЛТО2 та ЛТО3). А розрахована величина густини енергії лазерного променя згідно формули (1) знаходилась в діапазоні 1.6...0.53 кДж/см².

Безабразивну ультразвукову фінішну обробку (УЗО) здійснювали з використанням ультразвукового генератора УЗГ5-1.6/22 (потужність $P = 1.6$ кВт) та ультразвукової коливальної системи, яка містила магнітострикційний перетворювач, конічний хвилевод-концентратор та розроблений однобойковий наконечник (рис. 1б). На торці наконечника, який жорстко з'єднаний з концентратором, закріплювали бойок (ударник) у вигляді кульки діаметром 5 мм за допомогою державки. В процесі зміцнювально-оздоблювальної обробки деформаційний інструмент навантажували статичним зусиллям до оброблюваної поверхні. Під час деформаційної обробки, з використанням ультразвукового інструменту, зразок змащували рідиною з поверхнево активними речовинами. Процес УЗО здійснювали при наступних режимах: статичне навантаження зразка $F_c = 30$ Н, амплітуда ультразвукових коливань концентратора $A_{\text{узк}} = 20$ мкм, частота ультразвукових коливань концентратора $f_{\text{узк}} = 22$ кГц та швидкість переміщення зразка $S = 0.3$ м/хв.

Механічну енергію ультразвукового інструменту оцінювали за формулою [11]:

$$E_{\text{узі}} = m_b (E_{\text{узк}} + E_{\text{оке}}), \quad (2)$$

де m_b – маса бойка (кулька), $E_{\text{узк}}$ – кінетична енергія ультразвукового концентратора, $E_{\text{оке}}$ – додаткова кінетична енергія інструменту за рахунок обертання кульки на плоскій поверхні (рис. 1б).

Розрахована величина механічної енергії ультразвукового інструменту складала ~ 2.98 кДж.

Мікрорельєф поверхні та зони термічного впливу (ЗТВ), а також зони деформаційного впливу (ЗДВ) в поперечному перерізі шліфа, досліджували з використанням оптичного профілометра Leica DCM3D за допомогою конфокального об'єктива 10XLD. Амплітудні параметри 2D текстури поверхні визначали у відповідності із міжнародним стандартом ISO 4287.

Дослідження мікроструктури приповерхневих шарів проводили на оптичному мікроскопі «Nikon Optiphot-100» з максимальним збільшенням зображень $\times 1000$, а також ЗТВ в поперечному перерізі за допомогою мікроскопа «РЕМ 106І». Мікротвердість приповерхневих шарів вимірювали за допомогою цифрового приладу FM800 при навантаженні індентора Віккерса 0.5 Н та тривалості дії 12 с. Випробування мікротвердості зміцнених зон виконували по центру доріжки в поздовжньому напрямку на відстані від поверхні $\sim 20...40$ мкм, що забезпечувало умови відступу відбитку від поверхні зразка $2.5d$ (d є діагональ відбитку Віккерса).

Результати та їх обговорення.

Результати експериментальних досліджень (рис. 2) показали, що при лазерному термічному зміцненні досліджуваної інструментальної сталі (шляхом швидкого нагрівання тонкого шару вище критичної точки A_{C1} з наступним швидким охолодженням за рахунок тепловідведення тепла в основний об'єм металу) при мінімальній швидкості обробки (1 м/хв) та потужності лазерного променя 800 Вт (режим ЛТО1) формується зона термічного впливу (рис. 2а) із оплавленням поверхневого шару (зміцнення з фазовим переходом), що є не допустимим для обробки робочих поверхонь інструментів.

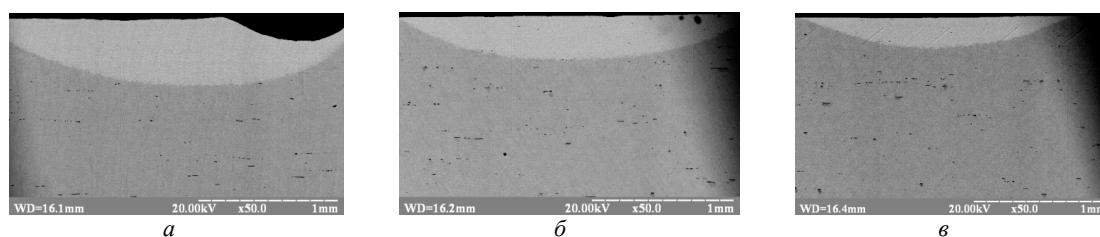


Рис. 2. Зона термічного впливу в інструментальній сталі У8 при ЛТО1 (а), ЛТО2 (б) та ЛТО3 (в)

Незначне зменшення мікротвердості приповерхневого шару при даному режимі (Рис. 3) обумовлене наявністю значної кількості залишкового аустеніту внаслідок повного розчинення цементиту, величина якого може досягати до 39% [9].

Відомо [5], що більш прогресивним є процес лазерного загартування інструментальної сталі без оплавлення поверхні. При більш високих швидкостях обробки (режими ЛТО2 і ЛТО3) відсутнє оплавлення профілю мікрорельєфу поверхні (рис. 2б,в). Проте, на оброблюваній поверхні утворюється оксидна (крихка) плівка, яка швидко руйнується в динамічних умовах навантаження. Крім того, виявлено, що при ЛТО спостерігається зменшення глибини зміцнення (рис. 3) та незначне збільшення мікротвердості поверхневого шару зі збільшенням швидкості обробки внаслідок збільшення швидкості охолодження приповерхневих шарів, що сприяє формуванню більш однорідної мікроструктури. Таким чином, із урахуванням вище наведеного слідує, що оптимальним режимом для лазерної обробки було обрано режим (ЛТО2) із швидкістю переміщення зразка 2 м/хв, який приводить до утворення більшої глибини зміцнення (300 мкм) в порівнянні із режимом (ЛТО3), а також забезпечує значне підвищення приблизно в 4 рази мікротвердості приповерхневих шарів в порівнянні з вихідним значенням (рис. 3).

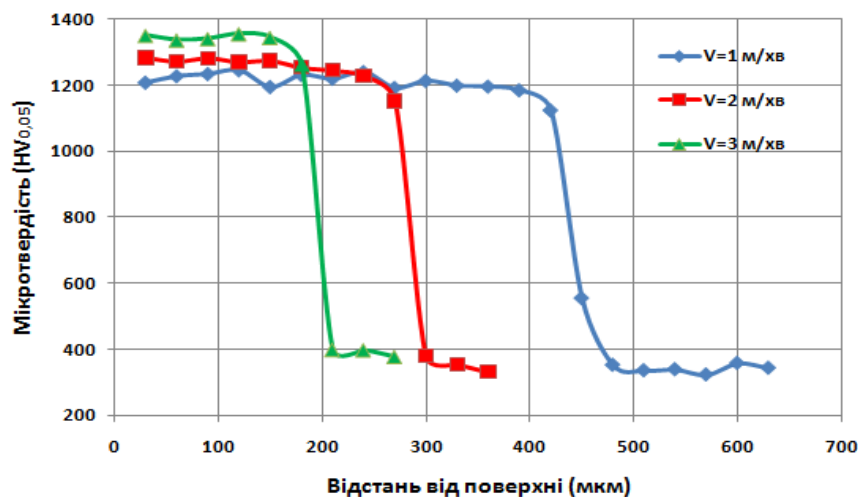


Рис. 3. Розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару інструментальної сталі У8 на різних режимах ЛТО

Результати експериментальних досліджень профілю мікрорельєфу поверхні (рис. 4) показують, що у порівнянні з вихідними параметрами мікрорельєфу поверхні ($Ra = 0.38$ мкм, $Wa = 0.22$ мкм), процес ЛТО без оплавлення нерівностей поверхні слабо впливає на шорсткість поверхні (рис. 5) та на її функціональні параметри, що пов'язано з термічною дією на поверхневий шар зразків за відсутності пластичних деформацій. Параметри мікрорельєфу можуть незначно змінюватися внаслідок формування оксидної плівки на оброблюваній поверхні. Таким чином, при ЛТО із без оплавленням поверхні є можливість цілеспрямовано зберігати вихідну геометрію оброблюваної поверхні.

Навпаки, ультразвукова поверхнево-пластична деформація дозволила значно поліпшити параметр шорсткості Ra поверхні приблизно в 3 рази та хвилястості (рис. 5) з великою опорною поверхнею при достатній її маслоємності за рахунок деформування (зминання) вершин мікронерівностей поверхні шляхом динамічного обкатування (вигладжування) інструментом. В процесі УЗО формується регулярний мікрорельєф на поверхні шляхом перекриття доріжок ($K_n = 0.5$), який характеризується однорідністю мікронерівностей профілю поверхні із забезпеченням високої маслоємності. Відомо [10,12], що формування регулярного мікрорельєфу на поверхні сприятиме до утримання поверхнею мастил та зниженню зношування (поліпшенню припрацювання) контактуючих деталей в процесі експлуатації.

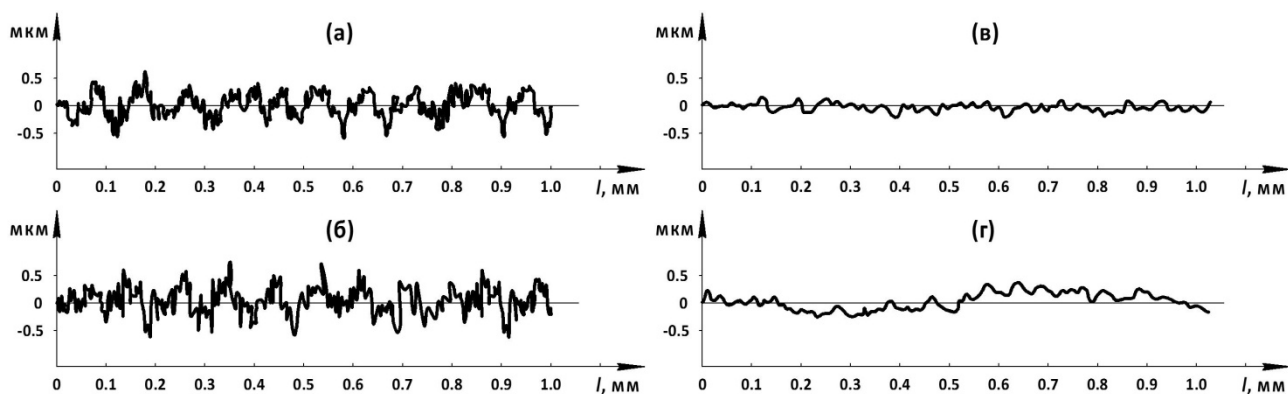


Рис. 4. Профіль шорсткості мікрорельєфу поверхні інструментальної сталі У8 у вихідному стані (а) та після ЛТО2 (б), УЗО (в), комбінованої обробки ЛТО2+УЗО (г)

Крім того, поверхнево-пластична деформація поверхні, яка попередньо зміцнена лазерним випромінюванням, сприяла поліпшенню як параметрів шорсткості, так і параметрів хвилястості мікрорельєфу поверхні у порівнянні з окремою ЛТО за рахунок сплюснення та зминання вершин мікронерівностей, а також руйнування та видалення оксидної плівки на поверхні (рис. 5). Слід відмітити, що отримані параметри профілю мікрорельєфу поверхні ($Ra = 0.2$ мкм) після комбінованої термдеформаційної обробки є вищими (гіршими) в порівнянні з обробленою поверхнею без ЛТО ультразвуковим деформуванням. У порівнянні із необробленою поверхнею, комбінована термдеформаційна обробка забезпечила зменшення в 2 рази параметру шорсткості поверхні (рис. 5). Отримані результати експериментальних досліджень шорсткості поверхні, шляхом запропонованого комбінованого термдеформаційного способу, добре корелюють із результатами досліджень мікрорельєфу поверхні інструментальної сталі Х12МФ з використанням волоконного лазера (з сканатором) та багатобойкового ультразвукового наконечника [10].

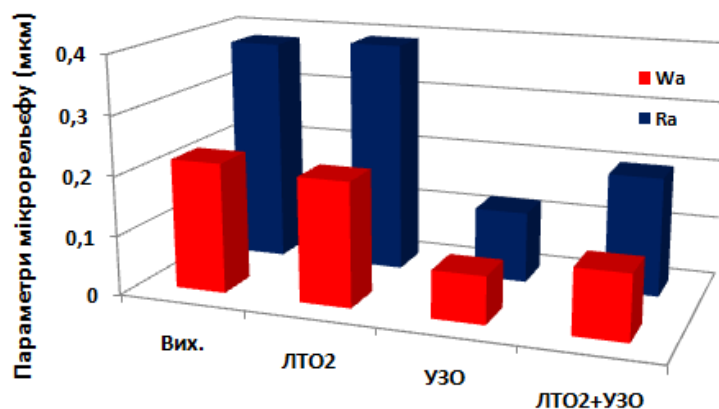


Рис. 5. Параметри мікрорельєфу поверхні інструментальної сталі У8 у вихідному стані та після ЛТО2, УЗО, комбінованої обробки ЛТО2+УЗО

Результати дослідження мікроструктури та фізико-механічних властивостей інструментальної евтектоїдної сталі У8 після різних методів поверхневої обробки приведено на рис. 6, 7. На рис. 6а приведено вихідну мікроструктуру зернистого (пластинчастого) перліту вуглецевої евтектоїдної сталі У8 у відпаленому стані, мікротвердість якого складала приблизно 300 НВ.

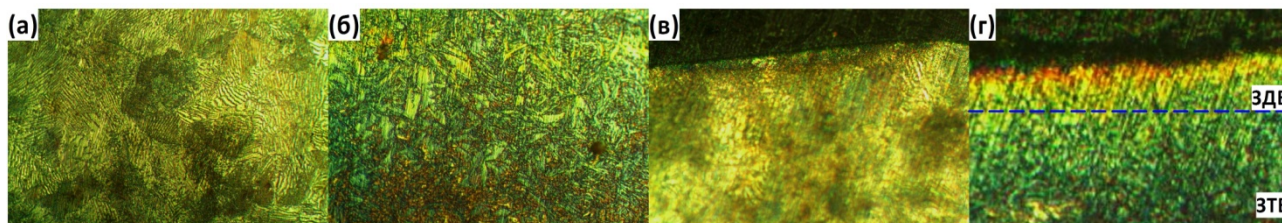


Рис. 6. Мікроструктура приповерхневого шару інструментальної сталі У8 (x1000) у вихідному стані при (а) та після ЛТО2 (б), УЗО (в), комбінованої обробки ЛТО2+УЗО (г)

Відомо [9], що при лазерному термозміцненні металів шляхом структурно-фазових перетворень окремі шари зони нагріваються на глибині до різних температур, внаслідок чого ЗТВ має пошарову неоднорідну будову. В приповерхневому шарі інструментальної сталі У8 нагрітим лазерним променем (швидкість переміщення зразка $S = 2$ м/хв.) до температури вище точки A_{C1} утворюється на місці перлітних зерен зона загартування із твердої фази з мартенситною структурою, а також тонкого перехідного шару до основного металу. Мікроструктура верхнього шару глибиною до 200...250 мкм складається з високодисперсного пластинчастого мартенситу та залишкового аустеніту (рис. 6б). Величина мікротвердості даного шару є досить високою 1250 НВ (рис. 7), незважаючи на наявність значної кількості залишкового аустеніту в досліджуваній сталі.

Отримані величини мікротвердості приповерхневих шарів добре узгоджуються із результатами приведеними в роботі [9]. А ближче до вихідного шару, мікроструктура плавно змінюється від мартенситно-троститної структури до вихідної перлітної структури на глибині 250...300 мкм (рис. 7). Крім того, в зоні термічного впливу присутня перехідна зона відпуску (структура троститу та сорбіту) з пониженою мікротвердістю, в якій поверхневий шар нагрівається нижче точки A_{C1} . В доповнення, в даному дослідженні не виявлено тріщин в ЗТВ.

При ультразвуковій поверхнево-пластичній деформації поверхні (рис. 6в), з використанням високочастотних коливань, спостерігається підвищення мікротвердості приповерхневого шару до 400 НВ

(рис. 7) за рахунок підвищення густини дислокацій, їх взаємодії, подрібнення блоків. Відомо [12], при ультразвуковій фінішній обробці величина густини дислокацій зростає до $3 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$, що є значно вище ніж в недеформованих металах $10^6 \dots 10^9 \text{ см}^{-2}$ та після обкатуванням роликком $6 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$. У порівнянні з вихідним станом, використана технологія ультразвукової фінішної обробки підвищила незначно мікротвердість приповерхневих шарів (приблизно на 35%) на глибині $\sim 30 \text{ мкм}$ (рис. 7). Крім того, формування гарантованих залишкових напружень стиску в приповерхневих шарах забезпечує відсутність тріщин в зоні термічного впливу.

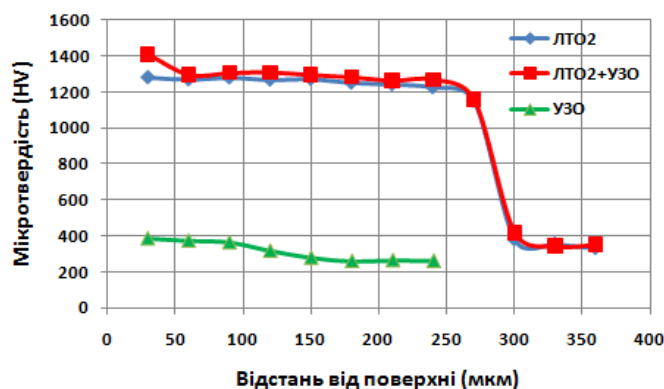


Рис. 7. Розподіл мікротвердості по глибині поверхневого шару інструментальної сталі У8 у вихідному стані та після ЛТО2, УЗО, комбінованої обробки ЛТО2+УЗО

На рис. 6г приведено мікроструктуру приповерхневого шару після лазерного термодформаційного зміцнення, яка складається з верхнього високодисперсного шару на глибині 50...60 мкм після впливу УЗО. Під впливом ультразвукової дії відбувається подрібнення мартенситних зерен та підвищення щільності дислокацій, що спричинює підвищення мікротвердості приповерхневого шару приблизно на 10...15% у порівнянні з окремою ЛТО (рис. 7). У порівнянні з вихідним станом, лазерне термодформаційне зміцнення забезпечило підвищення мікротвердості в 4.5 рази. Нижче знаходиться шар з високодисперсним мартенситом та залишковим аустенітом.

Таким чином, при комбінованому способі термодформаційного зміцнення та оздоблювання інструментальних (вуглецевих) сталей гарантується значне зростання мікротвердості поверхневого шару та поліпшення шорсткості поверхні, що сприятиме формуванню значних величин залишкових напружень стиску, а також зменшенню величини зношування робочих поверхонь інструментів.

Висновки

Встановлено, що комбінована термодформаційна обробка при визначеному режимі приводить до підвищення в 4.5 рази, в 3.5 рази та на 10...15% мікротвердості у порівнянні з вихідним станом, окремими ЛТО та УЗО, відповідно.

Крім того, комбіноване лазерне термічне зміцнення та наступне ультразвукове деформацийне зміцнення сприяє забезпеченню низьких параметрів мікрорельєфу поверхні, зокрема параметр шорсткості Ra зменшився приблизно в 2 рази у порівнянні з необробленою поверхнею.

Запропонований комбінований спосіб термодформаційного зміцнення та оздоблювання може бути успішно реалізований для підвищення зносостійкості поверхневого шару інструментальних виробів плоскої та циліндричної, а також складної форми за рахунок поліпшення геометричних та фізико-механічних властивостей поверхневого шару.

Автори статті вдячні проф. Ламікізу А., аспір. Мартінез С. (відділ машинобудування, Університет Країни Басків, м. Більбао, Іспанія) за надану можливість в проведенні експериментальних досліджень.

Аннотация. В данной статье, для улучшения микрорельефа и структуры поверхностного слоя инструментальной стали, предложен комбинированный способ лазерного термоупрочнения и последующего ультразвукового деформационного упрочнения и отделки. Приведены результаты экспериментальных исследований формирования микрорельефа на поверхности, а также закономерности изменения структуры и микротвердости поверхностного слоя инструментальной стали У8 с использованием CO_2 лазера и однобойкового ультразвукового наконечника. Установлено влияние технологических режимов лазерной термообработки (мощность лазерного излучения и скорость обработки) на структуру, микротвердость и размеры зоны термического влияния. Показано, что микротвердость приповерхностных слоев повысилась более чем в 3.5 раза при лазерной термообработке, а при ультразвуковой деформационной обработке на 30...40% по сравнению с исходным состоянием. Использование комбинированного термодформационного способа упрочнения и отделки обеспечило улучшение в 2 раза шероховатости и повышение в 4.5 раза микротвердости

поверхностного слоя по сравнению с необработанной поверхностью, что позволит повысить износостойкость рабочих поверхностей инструментов.

Ключевые слова: лазерная термообработка; ультразвуковая деформационная обработка; сталь У8, поверхностный слой; микрорельеф; шероховатость; структура; твердость.

Abstract. In this article, to improve the microrelief and structure of the surface layer of tool steel by combined method of the laser heat hardening and subsequent ultrasonic strain hardening and finishing was suggested. The results of experimental studies the formation of the microrelief on the surface, as well as the patterns of changes in the structure and microhardness of the surface layer of tool steel W8 using a CO₂ laser and one-pin ultrasonic tip, are presented. The influence of technological regimes of the laser heat treatment (power of a laser beam and feed rate) on the structure, microhardness and size of the heat affected zone were established. It is shown that the microhardness of the surface layers increased more than 3.5 times at the laser heat treatment and at the ultrasonic strain treatment by 30...40% in comparison with the initial state. Using the combined method of thermo-strain hardening and finishing provided improving in 2 times in the surface roughness and increasing in 4.5 times of the surface layer microhardness as compared with untreated surface. It will allow increasing the wear resistance of the working surfaces of tools.

Keywords: laser heat treatment; ultrasonic strain treatment; steel W8, surface layer; microrelief; roughness; structure; hardness.

References

1. Kovalenko, V. (1998), "Ways to intensify laser hardening technology", *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, vol. 47, pp. 133-136.
2. Poprawe, R. (2011), *Tailored Light 2. Laser application technology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Germany.
3. Cabeza, M., Castro, G., Merino, P., Pena, G. and Roman, M. (2012), "Laser surface melting: A suitable technique to repair damaged surfaces made in 14 Ni (200 grade) maraging steel", *Surface and Coating Technology*, vol. 212, pp. 159-168.
4. Rozmus-Gornikowska, M., Kusinski, J. and Blicharski, M. (2010), "Laser shock processing of an austenitic stainless steel", *Archives of Metallurgy*, vol. 55, pp. 635-639.
5. Kusinski, J., Kac, S., Kopia, A., Radziszewska, A., Rozmus-Gornikowska, M., Major, B., Major, L., Marczak, J. and Lisiecki, A. (2012), "Laser modification of the materials surface layer – a review paper", *Technical Sciences*, vol. 60, pp. 710-728.
6. Li, C., Wang, Y., Han, B. and Rena L. (2011), "Microstructure, hardness and stress in melted zone of 42CrMo steel by wide-band laser surface melting", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 49, pp. 530-535.
7. Leech, P.W. (2014), "Laser surface melting of a complex high alloy steel", *Materials and Design*, vol. 54, pp. 539-543.
8. Yilbas, B.S., Shuja, S.Z., Arif, A. and Gondal, M.A. (2003), "Laser-shock processing of steel", *J. of Materials Processing Technology*, vol. 135, pp. 6-17.
9. Golovko, L.V. and Luk'janenko, S.O. (2011), *Lazerni tehnologii' ta komp'juterne modeljuvannja (Laser technology and computer modeling)*, Vistka, Kyev, Ukraine.
10. Lesyk, D.A., Martinez, S., Dzhemelinskyi, V.V., Mordiyuk, B.N., Lamikiz, A. and Prokopenko, G.I. (2015), "Surface microrelief and hardness of laser hardened and ultrasonically peened AISI D2 tool steel", *Surface and Coating Technology*, vol. 278, pp. 108-120.
11. Mordiyuk, B.M. and Prokopenko, G.I. (2015), *Handbook of mechanical nanostructuring. Ultrasonic impact treatment – an effective method for nanostructuring the surface layers in metallic materials*, Wiley-VCH, Weinheim, Germany.
12. Holopov, Ju.V. (2008), *Mashinostroenie: ul'trazvuk: UZS, BUFO, GEO*, Tipografija Beresta, St.Peterburg, Russia.

Подана до редакції 14.11.2016